

# Литература

1. Маслов В. Г. Теория выбора оптимальных параметров при проектировании авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1981.
2. Черемушкин Г. А., Рулин В. И., Львов Г. С. Параметрические исследования сверхзвукового транспортного самолета второго поколения как метод поиска главных проблем его создания.— В сб.: Вопросы проектирования летательных аппаратов /КАИ, 1982.
3. Боргест Н. М., Маслов В. Г. К вопросу оптимизации параметров рабочего процесса ГТД для сверхзвуковых ЛА.— В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей /КуАИ, 1982.
4. Боргест Н. М. Математическая модель ТРДДФ в системе многорежимного самолета.— В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей /КуАИ, 1983.
5. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей /Под ред. С. М. Шляхтенко, В. А. Сосунова. М.: Машиностроение, 1979.

УДК 629.7.036.3.001.1 : 681.3.06

В. А. Григорьев, В. Б. Ломакин

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВЫСОТНО-СКОРОСТНЫХ И ДРОССЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВД В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Турбовинтовые двигатели нового поколения, имеющие по сравнению с ТРДД существенные преимущества в топливной экономичности, являются в настоящее время объектами интенсивных исследований. Основные отличия ТВД нового поколения — это высокие параметры рабочего цикла и наличие винтовентилятора (ВВ), высокоскоростного многолопастного воздушного винта.

Поскольку для дозвуковых транспортных самолетов полетный крейсерский режим определяет эффективность СУ в системе летательного аппарата, обычно выбор параметров и проектный расчет таких двигателей выполняется на данном режиме [1]. При этом оценка расхода топлива, запаса газодинамической устойчивости и других показателей ТВД при работе СУ на нерасчетных режимах (взлет, набор высоты, снижение и др.) производится путем определения высотно-скоростных (ВСХ) и дроссельных характеристик (ДХ).

В разрабатываемых до настоящего времени программах САПР ГТД эффективно действуют алгоритмы расчета характеристик различных типов ТРД и ТРДД [2]. Менее известны реализации программ для расчета характеристик вертолетных ГТД. В данной работе представлены особенности созданного алгоритма и программы расчета ВСХ и ДХ многовальных ТВД и ТВВД,

которые удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к математическим моделям САПР [3, 4].

Перспективными математическими моделями, которые наилучшим образом удовлетворяют этим требованиям, являются модели, основанные на непосредственном решении систем уравнений, определяющих режим работы ГТД.

Рассмотрим такую определяющую систему уравнений при расчете ВСХ и ДХ двухвального ТВД. Эту систему составляют уравнения, характеризующие условия совместной работы узлов в двигателе и программы регулирования. В общем случае для двухвального ТВД эта система будет выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} (F_{с. \text{ расч}} - F_{с. \text{ зад}})/F_{с. \text{ зад}} = 0; \\ (A_{т \text{ ВД расч}} - A_{т \text{ ВД зад}})/A_{т \text{ ВД зад}} = 0; \\ (A_{т \text{ НД расч}} - A_{т \text{ НД зад}})/A_{т \text{ НД зад}} = 0; \\ (n_{\text{НД расч}} - n_{\text{НД зад}})/n_{\text{НД зад}} = 0; \\ (N_{\text{рег. расч}} - N_{\text{рег. зад}})/N_{\text{рег. зад}} = 0, \end{array} \right. \quad (*)$$

где  $F_{с. \text{ расч}}$ ,  $F_{с. \text{ зад}}$  — расчетное и заданное значения площади выходного сопла;  $A_{т \text{ ВД расч}}$ ,  $A_{т \text{ ВД зад}}$ ,  $A_{т \text{ НД расч}}$ ,  $A_{т \text{ НД зад}}$  — расчетные и заданные значения пропускных способностей турбин высокого и низкого давления;  $n_{\text{НД расч}}$ ,  $n_{\text{НД зад}}$  — расчетное и заданное (либо  $n_{\text{НД}} = \text{const}$ , либо  $n_{\text{НД}}$  задано по определенной программе) значения физической частоты вращения ротора компрессора НД;  $N_{\text{рег. расч}}$ ,  $N_{\text{рег. зад}}$  — расчетное и заданное значения вектора параметров регулирования.

Уравнения, описывающие процессы в отдельных узлах и элементах двигателя, не включены в систему уравнений (\*) и замкнуты внутри математических моделей этих узлов и элементов.

В качестве независимых переменных системы уравнений (\*) выбраны:

- степень повышения давления в компрессоре низкого давления  $\pi_{к* \text{ НД}}$ ;
- степень повышения давления в компрессоре высокого давления  $\pi_{к* \text{ ВД}}$ ;
- расход воздуха через двигатель, приведенный к стандартным атмосферным условиям  $G_{в. \text{ пр}}$ ;
- температура газа перед турбиной высокого давления  $T_{г*}$ ;
- степень понижения давления в выходном устройстве  $\pi_{с}$ .

Обычно на начальных этапах проектирования не известны конкретные характеристики узлов двигателя. В то же время уже на этом этапе для разработанного алгоритма необходимо пользоваться уравнениями связи между параметрами турбокомпрессора и других узлов двигателя. Для этой цели были применены обобщенные характеристики компрессоров, представляемые в ЭВМ с помощью многомерного сплайна со свободными гранич-

ными условиями [5]. Основные достоинства сплайна: увеличенная точность описания характеристик по сравнению с существующими методами и возможность трехмерного описания семейства характеристик компрессоров с различными уровнями  $\pi_k$ .

В случае, если необходимо определить ВСХ турбовинтового двигателя, у которого заданы конкретные характеристики компрессора и турбины, применение многомерного сплайна позволяет использовать эту информацию для повышения точности расчета характеристик, что имеет важное значение в задачах идентификации и диагностики авиационных ТВД.

Другой особенностью математической модели ТВД является учет характеристик движителя (воздушного винта или винтовентилятора). Один и тот же движитель имеет разные характеристики на взлетном режиме и в полетных крейсерских условиях. Поэтому при расчете ВСХ в программе предусмотрено использование двух характеристик винта, общий вид которых в условиях взлета и крейсерского полета показан на рис. 1 и 2, где  $N_B/D_B^2$  — коэффициент нагрузки на ометаемую площадь винта;  $N_B$  — мощность, передаваемая на винт;  $D_B$  — диаметр винта;  $P_B/N_B$  — коэффициент преобразования мощности в тягу винта;  $\eta_B$  — к. п. д. винта;  $\beta = N_B/(\rho \cdot n_s^3 \cdot D_B^5)$  — коэффициент мощности винта;  $\rho$  — плотность воздуха;  $\lambda = V_{\pi}/(n_s \cdot D_B)$  — относительная поступь винта;  $V_{\pi}$  — скорость полета;  $n_s$  — число оборотов винта в секунду.

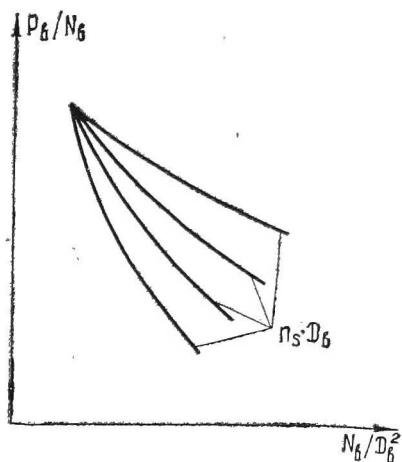


Рис. 1. Характеристика воздушного винта в условиях взлета

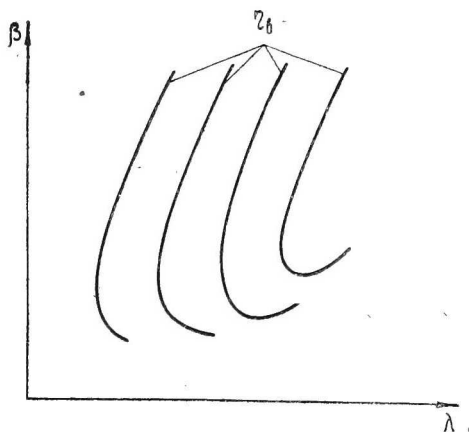


Рис. 2. Характеристика воздушного винта в условиях крейсерского полета

Созданная программа позволяет выполнять расчеты ВСХ и ДХ следующих схем ТВД: одновального и двухвального; одновального и двухвального со свободной турбиной.

При этом в расчетном крейсерском полетном режиме можно задать к. п. д. винта (винтовентилятора) и определить необходимые геометрические размеры винта. И наоборот, если заданы геометрические размеры, можно определить к. п. д. винта в полете и коэффициент преобразования мощности в тягу на взлете. В случае, когда характеристики винта неизвестны, в программе предусмотрена возможность задавать  $\eta_v = \text{const}$  (в крейсерском полете) и  $P_v/N_v = \text{const}$  (на взлете) (см. рис. 1, 2).

Программа позволяет практически реализовать следующие законы регулирования:

$N_v = \text{const},$	$n_{HD} = \text{const};$	$N_v = \text{const},$	$n_{HD} = \text{var};$
$N_v = \text{const},$	$n_{HD} = \text{const};$	$N_v = \text{const},$	$n_{HD} = \text{var};$
$P_{dv} = \text{const},$	$n_{HD} = \text{const};$	$P_{dv} = \text{const},$	$n_{HD} = \text{var};$
$T_r^* = \text{const},$	$n_{HD} = \text{const};$	$T_r^* = \text{const},$	$n_{HD} = \text{var}.$

Эти законы регулирования охватывают практически весь диапазон возможных условий расчета характеристик.

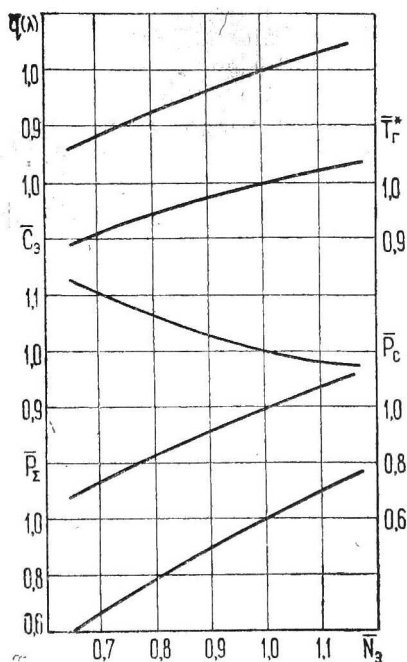


Рис. 3. Дроссельная характеристика двухвального ТВД в условиях взлета ( $H=0$ ,  $M=0$ )

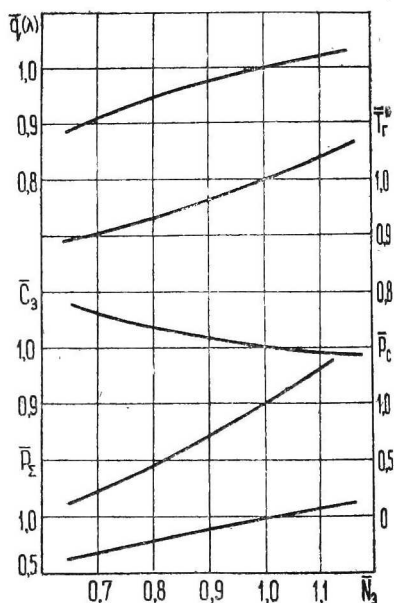


Рис. 4. Дроссельная характеристика двухвального ТВД в условиях крейсерского полета ( $H=11$  км,  $M=0,8$ )

Разработанная программа реализована на языке ФОРТРАН ОС ЕС, занимает 200 К оперативной памяти. Для ЭВМ ЕС-1033

время расчета одной точки высотно-скоростной характеристики равно 5—8 сек.

Программный комплекс использован в САПР ГТД в виде отдельного модуля, позволяющего определять параметры ТВД на режимах, связанных с выполнением полета по заданной траектории. В качестве примера на рис. 3 и 4 представлены дроссельные характеристики двухвального ТВД с обобщенными характеристиками узлов, определенные на режиме крейсерного полета и в условиях взлета.

Другим назначением этой программы является определение обобщенных дроссельных характеристик, используемых в САПР в виде передаточных моделей и позволяющих существенно сократить затраты машинного времени при оптимизации параметров ТВД [6].

## Литература

1. Маслов В. Г. Теория выбора оптимальных параметров при проектировании авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1981.
2. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей /Под ред. С. М. Шляхтенко, В. А. Сосунова. М.: Машиностроение, 1979.
3. Дружинин Л. Н., Швец Л. И., Ланшин А. И. Математическое моделирование ГТД на современных ЭВМ при исследовании параметров и характеристик авиационных двигателей.— Тр. ЦИАМ, 1979, № 832.
4. Мац Э. Б., Тунаков А. П. Требования к современным математическим моделям ГТД.— Изв. вузов. Авиационная техника, 1982, № 1.
5. Коварцев А. Н., Ломакин В. Б. Представление в ЭВМ обобщенных характеристик компрессоров ГТД с помощью многомерного параболического сплайна со свободными граничными условиями.— В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей /КуАИ, 1983.
6. Григорьев В. А., Иванов А. Б., Кузьмичев В. С. и др. Разработка передаточных моделей, связывающих параметры рабочего процесса авиационных ГТД на различных режимах работы.— В кн.: Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов.— Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Харьков, 1983.